



УДК 621.31

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕНЗО-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ПОСТОЯННОЙ И ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ****A COMPARATIVE EVALUATION OF THE ENERGY CONSUMPTION PARAMETERS OF A GASOLINE GENERATOR SET WITH CONSTANT AND VARIABLE ROTATIONAL SPEED**

**Аскеров Дмитрий Рафаелович**, магистрант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: dima.net.94@mail.ru, Тел.: +7(950)6562505

**Соколов Игорь Владимирович**, магистрант каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: igorsokolovf@gmail.com, Тел.: +7(343)3754564

**Казакбаев Вадим Маратович**, ассистент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: kazakbaev@inbox.ru, Тел.: +7(912)6711772

**Дмитриевский Владимир Александрович**, к-т техн. наук, доцент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vdmtrievsky@gmail.com. Тел.: +7(343)3754564

**Практ Владимир Алексеевич**, к-т техн. наук, доцент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: emf2010@mail.ru. Тел.: +7(343)3754564

**Dmitry R. Askerov**, Master student, Department «Electrical Engineering and Electrotechnology», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: dima.net.94@mail.ru. Ph.: +7(950)6562505

**Igor V. Sokolov**, Master student, Department «Electric machines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: igorsokolovf@gmail.com. Ph.: +7(343)3754564

**Vadim M. Kazakbaev**, Assistant lecturer, Department «Electrical Engineering and Electrotechnology», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: kazakbaev@inbox.ru. Ph.: +7(912)6711772

**Vladimir V. Dmitrievskii**, Candidate of Engineering Sc., Department «Electrical Engineering and Electrotechnology», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vdmtrievsky@gmail.com. Ph.: +7(999)765-43-21

**Vladimir V. Prakht**, Candidate of Engineering Sc., Department «Electrical Engineering and Electrotechnology», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: emf2010@mail.ru. Ph.: +7(343)3754564

**Аннотация:** В работе приведен сравнительный расчетный анализ энергетических показателей бензо-генераторных установок с постоянной и переменной частотами вращения. Сделаны выводы относительно преимуществ применения установки с переменной частотой вращения.

**Abstract:** The paper presents a comparative mathematical study of the energy parameters of two gasoline generator sets with constant and variable rotational speed. Issues include the advantages of using a generator set with variable speed.

**Ключевые слова:** бензо-генератор; моделирование; энергоэффективность.

**Key words:** gasoline generator set; simulation; energy efficiency.

## ВВЕДЕНИЕ

Электроснабжение объектов малой мощности, не подключенных к центральному электроэнергетическим объектам, часто осуществляется по средствам бензо-генераторных установок (БГУ) [1]. БГУ находят большее применение в качестве автономных источников, поскольку отвечают требованиям надежности, долговечности и большого моторесурса [1]. Однако горючее, необходимое для работы БГУ, привозится из удаленных районов. Так, стоимость топлива суммируется из цены транспортировки и стоимости бензина. С другой стороны, большинство БГУ работает при постоянной частоте вращения вала во всем диапазоне изменения нагрузки [1], что обеспечивается наличием электронной или механической схемы регулирования частоты вращения, которая управляет подачей топлива и обеспечивает защиту от перегрузки. При возрастании нагрузки электромагнитный момент на обмотках генератора начинает замедлять вращение ротора, что, в свою очередь, является сигналом к увеличению подачи топлива для регулятору частоты вращения. В результате выходная частота стабилизируется.

При постоянной частоте вращения основные показатели БГУ (расход топлива, КПД и др.) можно оценивать по одному из показателей, например, по эффективной мощности  $N_E$ . Типовая нагрузочная характеристика для бензинового двигателя при постоянной частоте вращения показана на рисунке 1а [1]. Анализ этой нагрузочной характеристики показывает, что при малых значениях мощности удельный расход топлива значительно увеличивается. Следовательно, БГУ работает с неоптимальным расходом топлива при постоянной частоте вращения и при переменной нагрузке.

Поскольку современные тенденции развития бензо-генераторных установок (БГУ) устанавливают требования по увеличению энергоэффективности привода, была предложена конструкция БГУ с переменной частотой вращения [2]. На рисунке 2а приведена классическая схема БГУ с постоянной частотой вращения. В этом случае генератор непосредственно подключается к нагрузке, поэтому скорость вращения  $n$  и напряжение на выходе генератора  $U$  должны поддерживаться постоянными. БГУ с переменной частотой вращения (рисунок 2б), называемые также «инверторными» БГУ, отличаются наличием электронного преобразователя частоты (ПЧ), преобразующего напряжение генератора

переменной амплитуды и частоты в трехфазное напряжение с требуемыми постоянными величинами амплитуды и частоты. Особенностью таких БГУ также является то, что задание частоты вращения вала установки  $n_{opt}$  определяется на основании измеренных параметров электрической нагрузки (например, тока нагрузки  $I$ ) [3]. Выбирается такое значение  $n_{opt}$ , чтобы при данной мощности нагрузки получить минимум потребления топлива.

## РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Для количественной оценки эффекта экономии топлива, который может дать применение БГУ с переменной скоростью вращения, был произведен расчет с помощью математической модели, описанной ниже. Бензиновый двигатель внутреннего сгорания (ДВС) 1,5 кВт, 3000 об/мин моделировался упрощенно [2]. Максимальная нагрузка бензинового двигателя ограничивается максимальным паспортным моментом, достигаемым при предельном угле отпираания дроссельной заслонки, то есть при максимальной подаче горючей смеси. Максимальный момент ДВС был принят равным 6 Н·м.

Уравнение механического равновесия на валу генераторной установки можно сформулировать как [2]:

$$T_E(d) = T_D + T_R(\omega) + T_L(P_L, n), \quad (1)$$

где  $T_E$  – момент ДВС;  $T_D$  – динамический момент;  $T_R$  – момент потерь мощности в ДВС;  $T_L$  – момент нагрузки, создаваемый генератором, Н·м;  $\omega$  – угловая механическая частота вращения;  $P_L$  – электрическая мощность, которую БГУ отдает нагрузке, Вт;  $d$  – расход топлива на 1 оборот ДВС, грамм.

Количество потребляемого топлива  $S_h$  пропорционально сумме мощности, потребляемой генератором, и мощности потерь в первичном двигателе, связанных с трением, потерей тепла в цилиндрах и др. [2]:

$$S_h = \frac{k_1}{m_1} \cdot \left( \frac{P_L}{\eta_G \cdot \eta_C} + r_0 \cdot \omega + r_1 \cdot \omega^2 \right) \cdot h, \quad (2)$$

где  $P_L$  – полезная электрическая мощность, Вт;  $\eta_G$  – КПД генератора;  $\eta_C$  – КПД ПЧ;  $r_0$ ,  $r_1$  – коэффициенты потерь в ДВС;  $m_1 = T_E/d$ ;  $k_1 = 3600/(1000 \cdot 4\pi) = 0,2866$ ;  $h$  – количество часов работ при данной мощности, час.

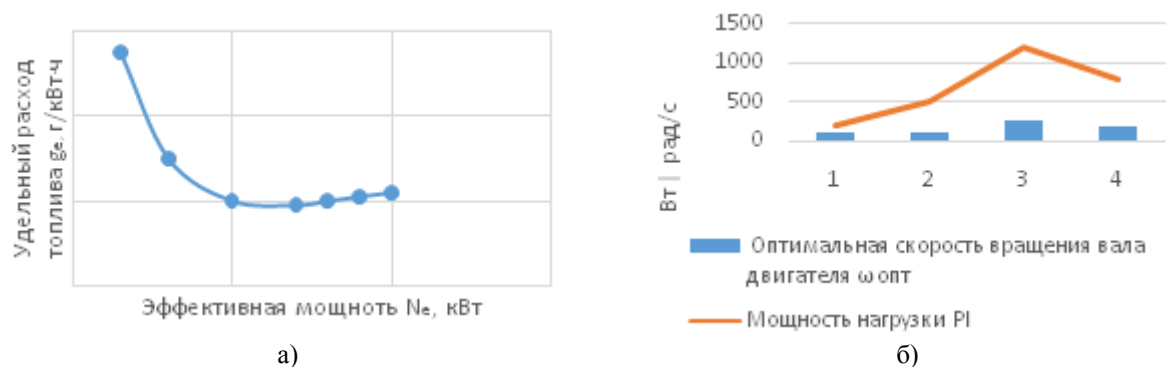


Рис. 1. а) Зависимость удельного потребления топлива от полезной мощности для бензинового двигателя ( $n = \text{const}$ ) б) Зависимость оптимальной скорости вращения от мощности нагрузки

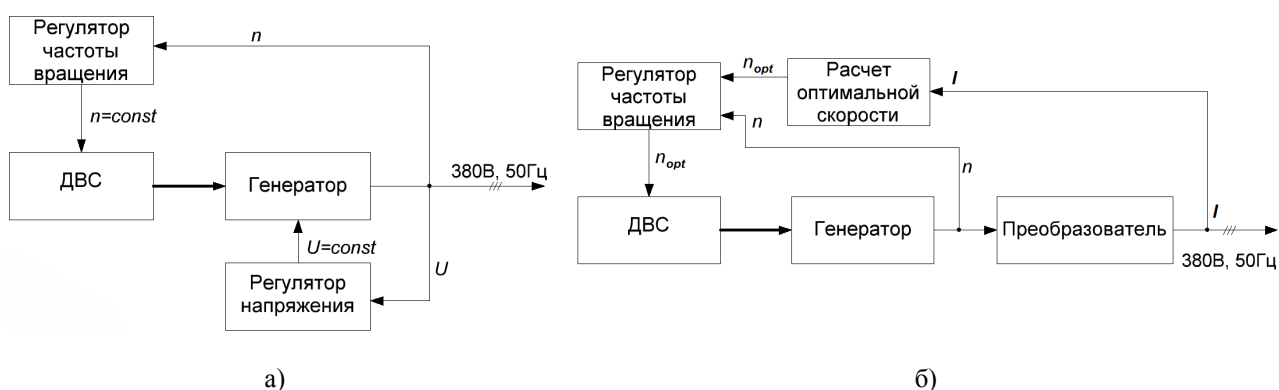


Рис. 2. Структурные схемы БГУ а) с постоянной скоростью  $n$  б) с переменной скоростью  $n$

Таблица 1.

Результаты расчета БГУ с постоянной частотой вращения

№	Мощность нагрузки $P_L$ , Вт	Частота вращения $\omega$ , рад/с	Мощность потерь в ДВС $P_E$ , Вт	Мощность потерь в генераторе $P_G$ , Вт	Суммарная мощность потерь в БГУ ( $P_E + P_G$ ), Вт	Расход топлива $S_h$ , грамм
1	200	314	176,0	37,1	213,1	131,54
2	500	314	175,9	65,3	241,2	236,03
3	1200	314	175,6	138,5	314,1	482,15
4	800	314	175,8	92,3	268,0	340,09
	Итого:		703,3	333,2	1036,4	1189,83

Таблица 2.

Результаты расчета БГУ с переменной частотой вращения

№	Мощность нагрузки $P_L$ , Вт	Частота вращения $\omega$ , рад/с	Мощность потерь в ДВС $P_E$ , Вт	Мощность потерь в генераторе $P_G$ , Вт	Суммарная мощность потерь в БГУ ( $P_E + P_G$ ), Вт	Расход топлива $S_h$ , грамм
1	200	104,7	29,3	34,6	63,9	84,03
2	500	104,7	29,1	86,1	115,2	195,90
3	1200	250	118,2	164,2	282,5	472,093
4	800	170	62,2	110,8	172,9	309,81
	Итого:		238,7	395,8	634,5	1061,85

Коэффициенты  $\gamma_0$ ,  $\gamma_1$  и  $m_1$  могут быть определены из паспортных характеристик ДВС [2]. Из (2) следует, что основной задачей при оптимизации расхода топлива при заданной  $P_L$  является минимизация потерь мощности в БГУ.

Функция для  $\eta_G = f(n, T_L)$  была задана таблично по данным испытаний синхронной реактивной машины мощностью 1,5 кВт в генераторном режиме. Величина  $\eta_c = 1$  была принята постоянной.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Для расчета потребления топлива был принят четырехчасовой цикл работы БГУ с величинами почасовой нагрузки: 200 Вт, 500 Вт, 1200 Вт и 800 Вт. Таблица 1 показывает результаты расчета потерь в БГУ и потребленного топлива для случая постоянной скорости  $n = 3000$  об/мин. Таблица 2 показывает результаты для БГУ с теми же параметрами при выборе  $n$ , обеспечивающей минимум потерь в БГУ. Рассчитанные  $s$  для этого случая величины  $n$  в зависимости от мощности  $P_L$  также показаны на рисунке 1б.

Отметим, что поскольку минимальная устойчивая скорость карбюраторного двигателя составляет 1000-1200 об/мин [4], то минимальная скорость вращения, задаваемая регулятором в модели, равна 104,7 рад/с.

При сравнении полученных данных (таблица 1 и таблица 2) можно заключить, что регулирование частоты вращения БГУ позволило снизить потери в рассматриваемом рабочем цикле в 1,6 раза. Количество потребляемого топлива при этом снизилось более чем на 10 %.

Следует также отметить, что помимо повышенного топливопотребления, другими негативными факторами работы БГУ без регулирования скорости являются: повышенные шум и вибрация при работе на малых нагрузках; повышенный износ подвижных узлов БГУ [1].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1) Проблема повышения энергоэффективности автономных генераторных установок имеет высокую актуальность, которая обусловлена как имеющими требованиями к рабочим характеристикам, так и потребностью потребителей в электроэнергии с высокими параметрами качества и низкой стоимостью.

2) Регулирование скорости вращения позволяет существенно снизить топливопотребление БГУ, шум и вибрации при работе с пониженной нагрузкой, а также повысить эксплуатационный ресурс. Это, вместе с улучшением показателей качества питающего напряжения [1], позволяет оправдать удорожание БГУ с переменной скоростью вращения из-за наличия более сложной системы управления и силового электронного преобразователя.

3) В диапазоне рабочих скоростей ДВС, чем ниже скорость вращения при той нагрузке агрегата, тем меньше потери и потребление топлива. Основным фактором, требующим увеличения скорости вращения, является ограничение перегрузочной способности по моменту для генератора и первичного двигателя. Также существенным фактором может быть снижение КПД агрегатов при работе с перегрузкой.

4) Возможность проектирования инверторного БГУ на повышенную частоту вращения позволяет уменьшить момент на валу агрегата и снизить габариты генератора и первичного двигателя.

5) Принцип действия БГУ с переменной скоростью вращения (рисунок 2б) позволяет применение в качестве генератора электрических машин, не имеющих щеточных контактов и/или обмоток на роторе. Для применения в инверторных БГУ наиболее подходят асинхронные, синхронные реактивные, вентильно-индукторные машины, а также машины с постоянными магнитами. Это дает возможность существенно повысить надежность и ресурс работы БГУ, а также снизить его габариты.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хватов О.С. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала/ О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.М. Тарасов // «Вестник ИГЭУ», № 2, 2010.
2. J. Leuchter, P. Bauer, V. Rerucha, V. Hajek, "Dynamic Behavior Modeling and Verification of Advanced Electrical-Generator Set Concept", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No.1, pp. 266-279, January 2009.
3. Герасимов А. Дизель-генераторные электростанции. Работа при переменной частоте вращения/ А. Герасимов // Новости электротехники, № 4 (34), 2005.
4. Якунин Н.Н. Расчет автомобильных двигателей/ Н.Н. Якунин, Р.Ф. Калимулин, С.В. Горбачев// Методические указания к курсовому проекту. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. — 32 с.